

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ МАШИН, СПОРУД І ТЕХНОЛОГІЙ

КАФЕДРА ТЕХНОЛОГІЇ І ОБЛАДНАННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОГО  
ВИРОБНИЦТВА

## МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

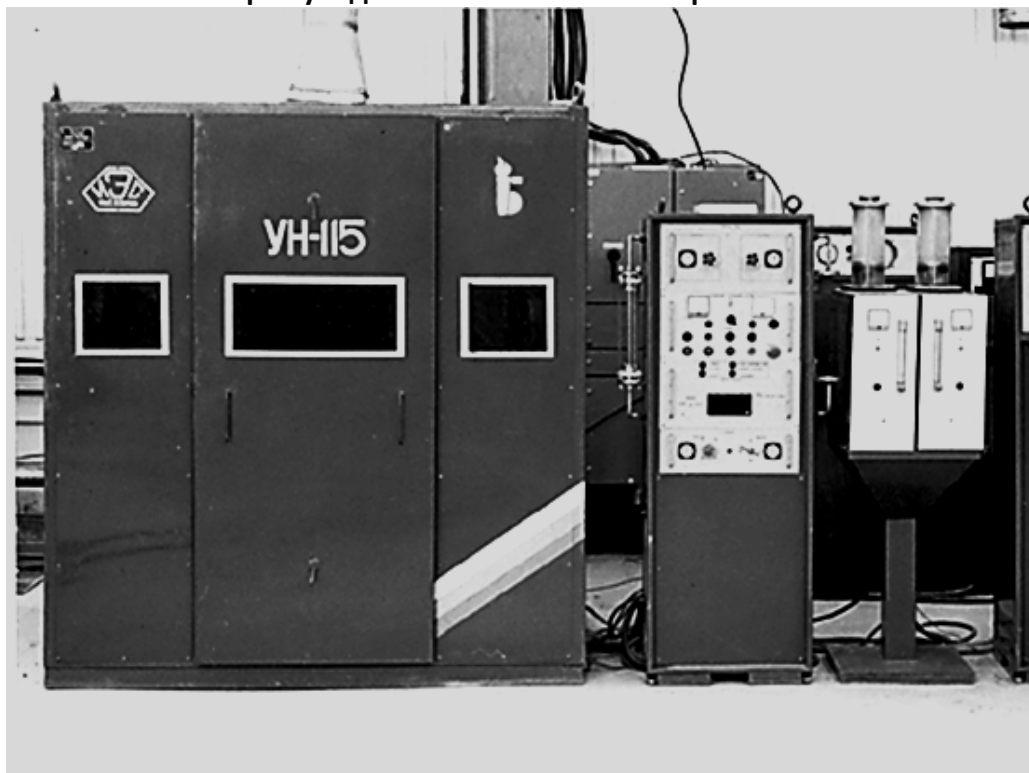
до лабораторних робіт

з дисципліни:

**«НАПЛАВЛЕННЯ ТА НАПИЛЕННЯ»**

**РОЗДІЛ «НАПИЛЕННЯ»**

для студентів денної та заочної форми навчання для підготовки  
фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр»  
напряму підготовки 6.050504 «Зварювання»



**УДК 621.79**

**ББК 30.61**

**М54**

Укладачі:

докт. техн. наук, професор Пулька Ч.В.

асистент Степанов Д.В.

асистент Сенчишин В.С.

Рецензент:

докт. техн. наук, професор Барановський В.М.

Розглянуто й затверджено на засіданні кафедри технології і обладнання зварювального виробництва. Протокол №7 від 22.02.2017р.

Затверджено та рекомендовано до друку на засіданні методичної комісії ФМТ ТНТУ імені Івана Пулюя. Протокол №6 від 06.03.2017 р.

**М54**

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Наплавлення та напилення». Розділ «Напилення» / Ч.В. Пулька, Д.В. Степанов, В.С. Сенчишин. – Тернопіль.: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017. –47 с.

Методичні вказівки розроблено відповідно до навчального плану та робочої програми з дисципліни «Наплавлення та напилення» для підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр» напряму підготовки 6.050504 «Зварювання».

**УДК 621.791**

**ББК 30.61**

© Ч.В. Пулька, Д.В. Степанов, В.С. Сенчишин., 2017

© ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017

## ЗМІСТ

<b>Вступ</b> .....	4
<b>Лабораторна робота №1</b> «Вивчення параметрів режиму роботи обладнання для струменево-абразивної обробки при підготовці поверхні для напилення». . . . .	5
<b>Лабораторна робота №2</b> «Вивчення продуктивності і коефіцієнта використання матеріалу (КВМ) при газополуменовому напиленні».....	10
<b>Лабораторна робота №3</b> «Вивчення продуктивності і коефіцієнта використання матеріалу (КВМ) при електродуговому напиленні» .....	18
<b>Лабораторна робота №4</b> «Вивчення продуктивності і коефіцієнта використання матеріалу (КВМ) при плазмовому напиленні» .....	27
<b>Лабораторна робота №5</b> «Дослідження залишкових напруг в системі «основа-покриття» при газотермічному нанесенні покриття» .....	34
<b>Лабораторна робота №6</b> «Вивчення швидкості руху частинок матеріалу в процесі напилення покриття» .....	40
<b>Література</b> .....	45

## **ВСТУП**

Дисципліна «Наплавлення та напилення» – 2. розділ «Напилення» з узагальненим об'єктом діяльності бакалавра за спеціальністю 6.050504 «Зварювання» - процеси створення нероз'ємних з'єднань, поверхонь, зварювальне устаткування, охоплює процеси створення поверхонь газотермічними і вакуумно-конденсацийними методами нанесення покриття.

Вона входить до переліку дисциплін професійної та практичної підготовки нормативної частини державної освітньо-професійної програми підготовки бакалаврів за напрямком 6.050504 «Зварювання».

Перед виконанням лабораторної роботи студент повинен ознайомитися зі змістом роботи, усвідомити її мету та завдання, засвоїти правила техніки безпеки при виконанні робіт в лабораторії нанесення покриття, відповісти на контрольні питання викладача і отримати дозвіл на виконання роботи.

Прийом робіт викладачем проводиться по мірі їх виконання.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

### ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ РОБОТИ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СТРУМЕНЕВО-АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ПРИ ПІДГОТОВЦІ ПОВЕРХНІ ДЛЯ НАПИЛЕННЯ

**Мета роботи:** набуття практичних навичок роботи обладнання для струменево-абразивної обробки поверхні, налагодження роботи обладнання, визначення технологічних параметрів.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

При газотермічному напиленні функціонального покриття, якість покриття залежить від підготовки поверхні виробу.

Для очищення і активації поверхні використовують механічну, хімічну і термічну обробку.

Найбільш універсальним вважається струменево-абразивний спосіб підготовки поверхні, який є найбільш продуктивний і економічний. Струменево-абразивна обробка забезпечує активацію поверхні і надає поверхні шорсткість  $R_z=10-60\text{мкм}$

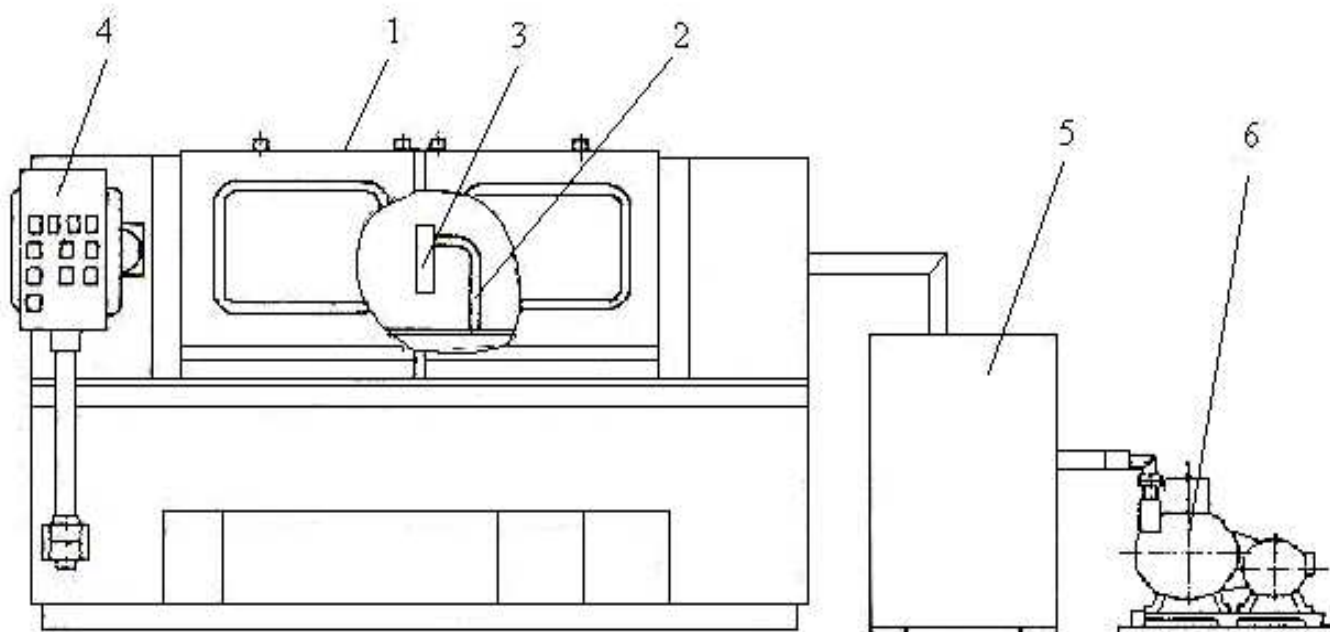
Для обробки використовують абразив у вигляді металевого дробу, марки Д4К, ДСК з номером 0,1; 0,2; 0,3, електрокорунд зерном 80-150 мкм.

При проведенні струменево-абразивної підготовки необхідно враховувати матеріал деталі (твердість, в'язкість), умови її експлуатації, якщо твердість поверхні до HRC 40, то рекомендується використовувати як абразив шліфзерно електрокорунду марок 12А;

13А; 14А; 15А зернистістю 63Н та 63П. Металевий дріб не рекомендується застосовувати для деталей з матеріалу, який має високу в'язкість (мідь, мідні сплави та інше), а також перед напиленням жаростійких і корозійностійких покриттів.

Перерва між струменево-абразивною обробкою і процесом напилення повинна бути не більше 32 годин в залежності від умов зберігання заготовок.

При масовому та крупносерійному виробництві деталей рекомендується використовувати механічні, або автоматизовані комплекси. Одним з таких комплексів є установка 487РМ, технічні характеристики наведені в таблиці 1. Вона складається з: робочої камери 1 де знаходяться механізм переміщення 2, струменево-абразивного пістолету 3, і пульта керування 4. В допоміжне обладнання входить компресор 6 і ресивер 5. (Рис. 1).



*Рис.1 - Зовнішній вигляд установки 487РМ*

Таблиця 1 – Технічні характеристики установки 487PM:

Розміри оброблюваних деталей мм, не більше:	
довжина	1500
ширина	180
висота	250
діаметр	320
Маса оброблюваних деталей кг, не більше:	
циліндричних	100
плоских	250
Швидкість переміщення пістолетів, мм/с:	
пенпендикулярно осі шпинделя	4...80
поперечно осі шпинделя	1...50
Частота обертання шпинделя, об/хв	6,3..320
Кількість абразивно-струменевих пістолетів	2
Робочий тиск стиснутого повітря, МПа	0,5...0,63
Споживана потужність, кВт	6,75
Габаритні розміри напівавтомата, мм, не більше	5600x3500x2300
Вага напівавтомата, кг	2900

### НЕОБХІДНЕ ОБЛАДНАННЯ

1. Напівавтомат абразивно-струменевої обробки 487PM.
2. Абразиви різної грануляції.
3. Зразки металів з різною твердістю 500x100x3.
4. Лінійка, штангенциркуль, секундомір.
5. Мікроскоп МБС-9 з градуйованим шаблоном.

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Ознайомитись з конструкцією напівавтомата 487PM і схемою керування.
2. Підготувати зразки для обробки попередньо нанести фарбу.
3. Завантажити та закріпити зразки у камері установки.
4. Виставити швидкість переміщення пістолету і дистанцію обробки.
5. Зафіксувати розмір грануляцій абразиву.
6. Виставити тиск повітря 0,6 МПа.
7. Ввімкнути подачу повітря і абразиву, зафіксувати час видалення фарби зі зразка.
8. Заміряти за допомогою штангенциркуля діаметр плями.
9. Повторити досліди згідно пунктів 2-8 для відстані обробки деталь-пістолет 100; 150; 200 мм.
10. Дані експерименту занести до таблиці 2.

Таблиця 2. - Результати експериментальних досліджень

№ дослідів	Матеріал зразка	Твердість обробки матеріалу, HRC	Абразив: тип, грануляція, мкм	Діаметр плями, мм	Час очищення плями, с	Дистанція обробки, мм	Шорсткість поверхні Rz, мкм

11. За даними таблиці 2 побудувати графічні залежності дистанції обробки і часу до повного очищення плями.



12. За даними таблиці 2 побудувати графічні залежності часу обробки від матеріалу.
13. За допомогою мікроскопу і шаблону виміряти шорсткість поверхні.
14. В залежності від твердості і дистанції обробки за отриманими результатами дослідів по зміні шорсткості побудувати графічні залежності.

### **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ**

1. Перерахуйте технологічні параметри абразивно-струменевої обробки.
2. Що таке активація поверхні?
3. Призначення абразивно-струменевого способу активації поверхні?
4. Які матеріали застосовуються для обробки абразивно-струменевим способом?
5. Як впливають технологічні параметри на продуктивність абразивно-струменевої обробки?
6. Перерахуйте умови, відповідність яким дозволяє здійснювати абразивно-струменеву обробку матеріалів.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

### ВИЗНАЧЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ І КОЕФІЦІЄНТА ВИКОРИСТАННЯ МАТЕРІАЛУ (КВМ) ПРИ ГАЗОПОЛУМЕНЕВОМУ НАПИЛЕННІ

**Мета роботи:** визначити вплив технологічних параметрів на зміну КВМ та навчитися визначати продуктивність процесу при газополуменевому напиленні на плоску поверхню.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

При газополуменевому напиленні утворення потоку напилюваних часток відбувається за рахунок впливу полум'я на розпалюваний матеріал. Це призводить до його розплавлення (дріт або порошок) або підплавлення (порошок), диспергування та перенесення у вигляді потоку.

Газополуменеве напилення дозволяє наносити зносостійкі покриття з дротів, порошку, гнучкого шнура та прутка. Основною перевагою газополуменевого способу напилення над іншими газотермічними є мобільність і компактність обладнання.

Застосування газополуменевого способу нанесення покриття обмежується температурою розпилюючого струменя. Джерелом розплавлення, при газополуменевому напиленні є ацетилено-кисневе полум'я. Допускається застосування ацетиленозамінників, але температура продуктів горіння буде нижче ніж при згорянні ацетилену. Для подачі порошкового матеріалу застосовують транспортуючий газ. В якості транспортуючого газу можливо

застосовувати пальний газ або стиснене повітря. Стиснене повітря також, за допомогою спеціальних насадок, застосовують для обтиснення та прискорення розпилюючого струменю.

Важливим є також середовище перебування розпилених часток до їх закріплення на поверхні виробу. Даний спосіб дозволяє керувати хімічним складом продуктів горіння (нормальне, окислювальне та вуглецевисте полум'я).

До складу установки газополуменевого напилення входять: розпилювач, дозатор живильник (або пристрій подачі дроту та бухта з дротом), джерела пального газу, окислювача та транспортуючого газу, відповідно редуктори та шланги для газів, запобіжний затвор для пального газу.

Поширеного застосування набули пальники, що дозволяють розпилювати порошковий матеріал. Однією з важливих переваг порошків є можливість широко регулювати спектр їх хімічного складу. Важливою перевагою розпилення порошкового матеріалу, на відміну від дротів або прутків, являється можливість здійснювати їх напилення не досягаючи температури повного їх розплавлення. Таке напилення називають «холодним», адгезія підплавлених часток досягається за рахунок високої кінетичної енергії струменя. «Гаряче» ж напилення передбачає повне розплавлення частинок у потоці.

Одним з таких, що дозволяють здійснювати напилення «холодним» та «гарячим» способами є пальник типу «Євроджет». Пальник ЄВРОДЖЕТ XS-8 призначений для ручного газополуменевого напилення металевих порошків або, при наявності обладнання, напилення механізованим способом. Пальник комплектується 3-ма наконечниками (№1, 2, 3) для напилення з

подачею порошку з бункеру через інжекторний живильник («гаряче» напылення) і двома наконечниками (Е, Г) для зовнішньої подачі порошку у полум'я під дією гравітації («холодне» напылення).

В процесі налагодження пальника необхідно вибрати і з'єднати з стволом пальника необхідний наконечник, з'єднати з рукояткою кисневий та ацетиленовий шланги, перевернути пальник і приєднати ємність з порошком.

Слід пам'ятати, що при застосуванні полум'я є вірогідність виникнення зворотнього удару. Для запобігання виникнення зворотнього удару, слід застосовувати запобіжні затвори, а також дотримуватися послідовності відкриття (закриття) вентилів при підпалюванні (гасінні) полум'я. При підпалюванні полум'я слід спочатку відкрити вентиль подачі кисню, а потім вентиль подачі пального газу. При гасінні полум'я слід вийти на режим мінімальної потужності полум'я, а потім різко закрити вентиль пального газу після чого вентиль подачі кисню.

При проектуванні процесу напылення слід вибрати обладнання, яке буде задовольняти режим напылення конкретного виду та форми матеріалу. Для вибраного матеріалу слід здійснювати корекцію (оптимізацію) режимних параметрів напылення в діапазоні рекомендованих. Оптимізацію здійснюють для досягнення високих показників якості, якими здебільшого виділяють: висока міцність зчеплення, низька пористість, максимальний КВМ та ін. КВМ представляє собою відношення мас розпиленого та напыленого матеріалу, і відображає у відсоток матеріалу, що був застосований корисно (тобто сформував покриття).

$$KBM = \frac{m_1 - m_2}{m_3} \cdot 100\% , \quad (1)$$

де  $m_1$  – маса зразка з покриттям;  $m_2$  – маса зразка без покриття;  $m_3$  – маса розпиленого матеріалу.

З точки зору максимальної продуктивності та високого економічного ефекту – бажане отримання максимальної величини KBM. Виключення складають ті випадки, коли підвищення інших показників якості є більш важливим.

Оптимізацію KBM можна здійснювати дослідженням зміни його величини при зміні дистанції напилення. При замалих дистанціях напилення – частки надто перегріті струменем і при зіткненні з поверхнею відбувається їх розбризкування; при завеликих – поверхні зразка досягають вже охолоджені частки, які не можуть закріпитися на поверхні. Відповідно до наведених змін буде змінюватися продуктивність напилення:

(2)

де  $\tau$  – час напилення, год.

Зміна дистанції напилення обумовлює зміну величини плями напилення (діаметра розсіювання), товщини покриття утвореної за одиницю часу. Для досягнення запланованих показників слід вести розрахунок швидкості переміщення пальника відносно виробу для кожного конкретного випадку. При точковому (без відносного переміщення) напиленні можливо визначити швидкість товщини покриття у часі:

$$\omega = \frac{\delta}{t} = \frac{mm}{c} ,$$

де  $\delta$  – товщина покриття,  $t$  – час нерухомого перебування сопла пальника над поверхнею, під час напилення. Швидкість зростання покриття буде незмінною при сталих режимах напилення. Враховуючи таку швидкість, можна визначати необхідний час  $t$  для напилення необхідної товщини  $\delta_1$ , що не перевищує  $\delta$ . Для забезпечення утворення товщини  $\delta$  необхідно забезпечити час перебування сопла пальника на протязі часу  $t$  над кожною точкою траєкторії руху. Тобто рекомендується наступний вираз для розрахунку швидкості відносного переміщення пальника та виробу:

(3)

де  $D$  – діаметр плями, що утворилась при точковому напиленні, мм.

Напилення конкретної марки покриття для кожної конкретної установки ведуть згідно рекомендованих режимних параметрів. В таблиці 1 наведені орієнтовні параметри режиму напилення пальником ЄВРОДЖЕТ XS-8 відповідно до кожного наконечника.

Дистанція напилення в залежності від матеріалу для напилення, пальної суміші та обладнання яке використовується, знаходиться в межах 100...200 мм. Грануляцію використаних порошкових матеріалів витримують в межах 20...100 мкм.

Таблиця 1 - Орієнтовні параметри режиму напилення

Наконечник	Тиск газів, МПа		Витрати газів, дм <sup>3</sup> /год	
	кисню	ацетилену	кисню	ацетилену
1	0.2	0.05	1000	860

2	0.3	0.05	1000	860
3	0.35...0.4	0.05	1000	860
E	0.25	0.05	960	860
F	0.15	0.05	1100	1000

### **НЕОБХІДНЕ ОБЛАДНАННЯ, ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ**

1. Установка для газополуменового напилення.
2. Порошки для напилення.
3. Терези аналітичні, секундомір, штангенциркуль, лінійка.
4. Сталеві пластини 250 x 250 x 3 мм

### **ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ**

1. Ознайомитись з конструкцією газополуменового розпилювача, правилами техніки безпеки при роботі на газополуменових установках та переконатися в готовності обладнання до роботи.
2. Налаштувати нерухоме положення пальника відносно зразка та встановити дистанцію напилення 100 мм.
3. Зважити порцію порошкового матеріалу і завантажити її у бункер дозатора-живильника.
4. Підготувати до напилення зразок (очистити від бруду, обробити на абразивно-струменевій установці).
5. Зважити зразок. Маса порції порошку та зразка записати в таблицю 2.
6. Підібрати наконечник пальника для напилення і відповідний йому режим напилення занести в таблицю 3.
7. Увімкнути установку газополуменового напилення – встановити вибрані режимні параметри напилення (витрати окислюючого і горючого газів) згідно таблиці 3.

8. Увімкнути дозатор-живильник і в нерухомому положенні нанести покриття на зразок, фіксуючи час напилення, до повного використання порошку в дозаторі.
9. Зважити охолоджену пластину з покриттям, виміряти діаметр плями напилення, товщину напиленого шару. Результати занести до таблиці 2.
10. Провести розрахунки КВМ та продуктивності і застосувавши дані таблиці 2. Розрахувати швидкість переміщення розпилювача відносно виробу за формулою 2. Отримані дані занести до таблиці 3.
11. Повторити послідовність пунктів 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10 для дистанцій напилення 120, 140, 160, 180 та 200 мм.

Таблиця 2 - Результати експериментальних досліджень

№ досл іду	Тип поро-шку	Грану ляція $C_n$ , мкм	Час напи-лення $\tau$ , с	Маса зразка без покриття $m_2$ , г	Маса зразка з покрит-тям $m_1$ , г	Маса розпиленого порошку $m_3$ , г	Діаметр плями напилення $d$ , мм	Товщина напиленого шару $\delta$ , мм

Таблиця 3 - Вибрані технологічні параметри напилення

Режимні параметри		
Сумарні витрати горючої суміші в пальнику $Q_{\Sigma}$ , м <sup>3</sup> /год	Витрата горючого компонента $Q_g$ , м <sup>3</sup> /год	Дистанція напилення $L$ , мм

Таблиця 4 - Отримані розрахункові показники



№ досліджу	Дистанція напилання L, мм	КВМ, %	Продуктивність напилання П, кг/год	Швидкість переміщення пальника, $V_{\text{пальн.}}$ , м/хв

### ВИМОГИ ДО ЗВІТУ ПО РОБОТІ

1. Навести мету роботи.
2. Дати опис обладнання та інструментів, які були використані в роботі.
3. Описати порядок виконання роботи. Заповнити табл. 2, 3.
4. Провести розрахунки КВМ, продуктивності напилання та швидкості переміщення розпилювача відносно виробу. Розраховані дані занести до табл. 4.
5. Побудувати залежності КВМ, П та  $V_{\text{пальн.}}$  від L.
6. Зробити висновки по роботі.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Назвіть основні технологічні параметри процесу газополуменового напилання.
2. Що приймається до уваги при визначенні режимних параметрів пальника для нанесення покриття?
3. Які основні фактори впливають на продуктивність та КВМ газополуменового розпилювача?
4. Як змінюється КВМ процесу при зміні форми поверхні деталі, що напилюється?
5. Які шляхи підвищення продуктивності газополуменових пальників?
6. Як впливає на продуктивність та КВМ зміна способу подачі матеріалу?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

### ВИЗНАЧЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ І КОЕФІЦІЄНТА ВИКОРИСТАННЯ МАТЕРІАЛУ (КВМ) ПРИ ЕЛЕКТРОДУГОВОМУ НАПИЛЕННІ

**Мета роботи:** визначити вплив технологічних параметрів на зміну КВМ та навчитися визначати продуктивність процесу при електродуговому напиленні на плоску поверхню.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

При електродуговому напиленні утворення потоку напилюваних часток відбувається за рахунок впливу на дроти електричної дуги, що призводить до його розплавлення. Диспергування та перенесення у вигляді потоку, досягається за рахунок дії на розплавлені частки спрямованого потоку газу.

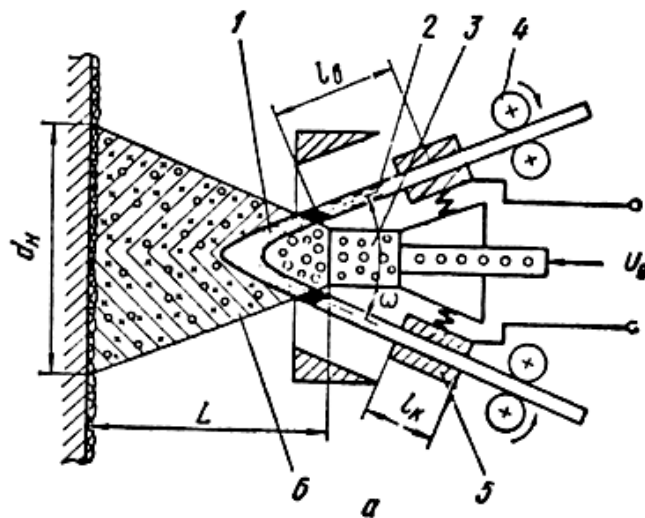
Електродугове напилення дозволяє наносити зносостійкі та корозійностійкі покриття. Основною перевагою цього способу напилення над іншими газотермічними є найвища продуктивність процесу.

Застосування електродугового способу нанесення покриття обмежується формою та властивостями розпилюваного матеріалу. Можливо застосовувати лише струмоведучі суцільні або порошкові дроти. Джерелом розплавлення, при електродуговому напиленні, є багатоамперна дуга. Можливе отримання біметалевих покриттів і псевдосплавів, а також покриттів зі спеціальними властивостями при використанні дротів з різних металів або порошкового дроту.

При електродуговій металізації площа активних плям на електродах обмежена невеликим діаметром дроту, який використовується для наплення. Діаметр дроту, який розпилюється, визначається залежно від технічних характеристик металізатора, що використовується для наплення із урахуванням стандартної номенклатури діаметрів дроту.

Частіше за все діаметр дроту вибирають у межах 1,0...3,0 мм. При максимальних діаметрах зростає турбуленізація струменя. При малих діаметрах дроту процес наплення ускладнюється завдяки «блуканню» кінців дроту, який плавиться в умовах високої швидкості подачі.

На формування струменю наплюваних часток впливає також кут сходження електродів  $2 - \omega$  (див. рис.1).



1 - електрична дуга; 2 - дріт; 3 - сопло; 4 - механізм подачі дроту; 5 - контактні пристрої; 6 - струмінь розпиленого матеріалу;  $l_v$  - величина вильоту дроту

Рис.1 - Схема електродугового наплення

При малих кутах часто утворюються два потоки часток з кожного дроту. Великі кути ускладнюють конструктивне виконання

розпилювача. На практиці оптимальний кут вибирають біля  $30^\circ$ . Суттєвий вплив на процес електродугового напилення чинить величина вильоту дроту від контактної пристрою 5 до торця дроту, що знаходиться в дузі  $l_b$  (див рис. 1). Зі збільшенням вильоту інтенсифікується виділення джоулевої теплоти. Особливо це характерно для металів з підвищеним питомим електричним опором (сталь, титан, нікель, тощо). Для цих металів швидкість плавлення дроту збільшується на 10...20%.

Диспергує напилювані частки швидкісний струмінь газу, що спрямований через отвір сопла 3. Такий газ називають розпилюючим. В якості розпилюючого газу здебільшого застосовують стиснене повітря. Енергію стисненого повітря також, в пристосованих пальниках, застосовують для подачі дроту в зону плавлення.

До складу установки електродугового напилення входять: розпилювач, котушки з дротом, джерело живлення, джерело розпилюючого газу.

При електродуговому напиленні необхідно враховувати інтенсивну взаємодію часток з активною газовою фазою, що призводить до насичення напилюваного металу киснем, азотом, великого вмісту оксидів у покритті. Запобігають цьому застосуванням самозахисного порошкового дроту або ведення процесу в ізольованій камері із захисною атмосферою. Перспективними шляхами лишаються розпилення металу захисними газами та додаванням пального газу до повітря або використання камер з низьким вакуумом.

Для отримання корозійностійких покриттів використовуються алюмінієвий або цинковий дроти. Для зносостійких покриттів

напилюють різні сталі, бронзи або композиційні покриття з різних металів.

Антифрикційні алюмінієво-сталеві, мідно-сталеві, мідно-свинцеві та інші псевдо-сплави можна отримати при використанні двох дротів з різних матеріалів, або за рахунок використання плакованих дротів.

Технологічними параметрами електродугового напилення є:

- струм дуги, А;
- напруга, В;
- діаметр дроту, мм і його матеріал;
- швидкість подачі дроту, м/хв;
- витрати розпилюючого газу, м<sup>3</sup>/год;
- дистанція напилення, мм;
- швидкість переміщення металізатора відносно виробу, м/хв або мм/об;
- число обертів циліндричної деталі, об/хв.
- кут перетинання електродів  $\omega$ , град

Найбільш важливими параметрами режиму електродугового напилення є потужність дуги та витрати розпилюючого газу.

Потужність дуги визначається величиною електричного струму та напругою. Як правило, напруга не є параметром, який регулюється. Вона визначається вольт-амперною характеристикою джерела живлення і знаходиться в межах 18...35 В.

Дуга є саморегулюючою системою в якій, залежно від швидкості подачі дроту, змінюється кут, швидкість плавлення, яка і визначає струм дуги. Тому, регулюючи швидкість подачі дроту

встановлюють необхідну величину потужності за допомогою зміни сили електричного струму, який в практиці електродугової металізації, як правило, знаходиться в межах 80...600 А. При цьому потужність дуги знаходиться в межах від 5 до 20 кВт.

До основних параметрів електродугового напилення належить також дистанція напилення, яка становить 60...150 мм, швидкість переміщення плями напилення, яка знаходиться у межах 3,0...5,0 м/хв.

Залежно від призначення покриття, виділяють вагомі показники якості (що вже описані в лаб. роб. №2).

На міцність зчеплення і пористість впливає розмір часток які утворюються при розпиленні дроту. Чим менше розмір часток тим ці показники кращі. З підвищенням струму (завдяки великим значенням ентальпії) середній розмір часток зменшується і можна отримати покриття з достатньою адгезійною та когезійною міцністю. З точки зору роботи обладнання, КВМ залежить від декількох факторів: потужність дуги (що обумовлює температуру та величину часток розплавленого дроту), діаметр вихідного сопла розпилювача та витрати газу (що обумовлюють швидкість руху та охолодження потоку часток). Таким чином величина КВМ може змінюватись зі зміною вказаних параметрів. Для кожного конкретного матеріалу при напиленні слід здійснювати налагодження якісних показників.

Оптимізацію КВМ можна здійснювати дослідженням зміни його величини при зміні дистанції напилення. При замалих дистанціях напилення частки надто перегріті струменем і при зіткненні з поверхнею відбувається їх розбризкування; при зовеликих поверхнях

зразка досягають вже охолоджені частки, які не можуть закріпитися на поверхні.

Зміна дистанції напилення обумовлює зміну величини плями напилення (радіусу розсіювання), товщини покриття утвореної за одиницю часу. Для досягнення запланованих показників слід вести розрахунок швидкості переміщення пальника відносно виробу для кожного конкретного випадку. Рекомендується наступний вираз для розрахунку швидкості відносного переміщення пальника та виробу:

### **НЕОБХІДНЕ ОБЛАДНАННЯ, ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ**

1. Апарат для електродугового напилення ЭМ-12М.
2. Дроти для напилення.
3. Терези аналітичні, секундомір, штангенциркуль, лінійка
4. Сталеві пластинки 500 x 500 x 3 мм.

### **ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ**

1. Ознайомитись з конструкцією електродугового розпилювача ЭМ-12М, правилами техніки безпеки під час роботи на установках електродугового напилення та переконатися в готовності обладнання до роботи.
2. Скласти план експерименту згідно з завданням викладача.
3. Зважити порцію дротяного матеріалу, виміряти його довжину. Визначити масу одиниці довжини дроту. Виміряти діаметр дроту і заправити в розпилювач. Отримані виміри занести в табл. 1.
4. Підготувати до напилення зразок (очистити від бруду, обробити на абразивно-струменевій установці).
5. Зважити зразок (масу зразка записати в таблицю 1).

6. Встановити необхідні режимні параметри напилення: струм дуги, витрату розпилюючого газу, швидкість подачі дротяного матеріалу, що відповідають стабільності горіння дуги. Занести режимні параметри до табл.2.
7. Встановити зразок на дистанції 60 мм.
8. Увімкнути установку та встановити режим електродугової металізації згідно табл. 2.
9. При нерухомому розпилювачі нанести покриття на зразок.  
Зафіксувати час напилення і занести його до табл. 1
10. Зважити пластину з покриттям, заміряти діаметр плями напилення, товщину напиленого шару. Результати занести до табл.1.
11. Скориставшись даними таблиці 1, провести розрахунки КВМ та продуктивності і швидкість переміщення розпилювача відносно виробу за формулами 1, 2 та 1 відповідно. Отримані дані занести до таблиці 3.
12. Повторити п.п. 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11 для інших пунктів плану експерименту для дистанцій напилення 80, 100, 120 та 140 мм.

Таблиця 1 - Результати експериментальних досліджень

№ досл.	Тип дроту	Діаметр дроту $d$ , мм	Маса 1мм дроту $m_3$ , г	Час напи- ння $\tau$ , с	Маса зразка, без покриття $m_2$ , г	Маса зразка з покрит- тям $m_1$ , г	Маса розпиленог о порошку $m_3 = m_3' \cdot V$ , г	Діаметр плями напиленн я $d_n$ , мм	Товщина напиленого шару $\delta$ , мм



Таблиця 2 - Режимні параметри нанесення покриття

Регульовані параметри			
Напруга на дузі U, В	Струм дуги I, А	Швидкість подачі дроту V, мм/с	Дистанція напилення L, мм

Таблиця 3 - Отримані розрахункові показники

№ дослід	Дистанція напилення L, мм	КВМ, %	Продуктивність напилення P, кг/год	Швидкість переміщення пальника, $V_{\text{пальн.}}$ , м/хв

### ВИМОГИ ДО ЗВІТУ ПО РОБОТІ

1. Навести мету роботи.
2. Дати опис обладнання та інструментів, які були використані в роботі.
3. Описати порядок виконання роботи. Заповнити табл.1, 2, 3.
4. Розрахувати продуктивність, КВМ та швидкість переміщення розпилювача відносно виробу. Розраховані дані занести до табл 3.
5. Побудувати залежності КВМ, П та  $V_{\text{пальн.}}$  від L.
6. Висновки по лабораторній роботі.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Наведіть основні технологічні параметри процесу електродугового напилення.
2. Які фактори впливають на продуктивність електродугового розпилювача?

3. Які особливості матеріалогазового потоку, що створює електродуговий розпилювач, в порівнянні з іншими видами газотермічних розпилювачів?
4. Які шляхи підвищення продуктивності електродугових розпилювачів?
5. Які існують способи збільшення КВМ електродугових розпилювачів?
6. Як може вплинути на продуктивність та КВМ зміна складу та температури розпилюючого газу?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

### ВИЗНАЧЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ І КОЕФІЦІЄНТА ВИКОРИСТАННЯ МАТЕРІАЛУ (КВМ) ПРИ ПЛАЗМОВОМУ НАПИЛЕННІ

**Мета роботи:** визначити вплив технологічних параметрів на зміну КВМ та навчитися визначати продуктивність процесу при плазмовому напиленні на плоску поверхню.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

При плазмовому напиленні утворення потоку напилюваних часток відбувається за рахунок впливу на розпалюваний матеріал (дріт, порошок) плазмового струменя. Плазмою називають прискорений високотемпературний іонізований потік газу. Цей струмінь призводить до розігріву, диспергування та перенесення потоку напилюваних часток.

Плазмово-дуговий метод рекомендується для напилення захисних, зміцнювальних та інших видів покриття. Можливо застосовувати дротяні матеріали та порошки. Основною перевагою цього способу напилення над іншими газотермічними є найвища температура струменя і можливість створення інертного середовища.

Плазмовий струмінь утворюється в плазмотроні внаслідок нагрівання плазмоутворювального газу при проходженні його через дугу або завдяки високочастотному індукційному нагріванні. Хімічна активність струменя обумовлює середовище перебування розпиленних

часток. В якості плазмоутворювального можливо застосовувати як активні (азот, повітря) так і інертні (аргон, гелій) газу, що дозволяє застосовувати широкий спектр розпалюваних матеріалів.

Для подачі до плазмового струменя дроту – застосовують універсальні приводи, порошкові ж матеріали подаються за допомогою спеціальних дозаторів-живильників. Газ (який застосовують у живильниках) для подачі порошкового матеріалу називають транспортуючим. Вибір транспортуючого газу здійснюють виходячи з необхідного середовища напilenня.

Взаємодія газу з електричною дугою призводить до підвищення його температури (5000-55000°C) та іонізації. Досягнення високих температур при плазмовому напilenні обумовлює необхідність активного повітряного чи водяного охолодження елементів розпилювача.

Досить важливим є можливість гнучкого керування електричного та газового режимів роботи плазмотрона, в тому числі в процесі напilenня, дає змогу керувати енергетичними характеристиками напильованих часток.

До складу установки плазмового напilenня входять: плазмотрон, дозатор-живильник або пристрій подачі дроту, джерело живлення, джерело плазмоутворювального (транспортуючого) газу.

Технологічними параметрами плазмового напilenня є:

- струм дуги, А;
- напруга на дузі, В;
- грануляція порошку, мкм (або діаметр дроту, мм);
- витрати порошку, кг/год (або швидкість подачі дроту, м/хв);

- вид та витрати плазмоутворювального газу, м<sup>3</sup>/год;
- діаметр сопла плазмотрона, мм;
- дистанція напилення, мм;
- швидкість переміщення плазмотрона відносно виробу, м/хв або мм/об;
- число обертів циліндричної деталі, об/хв.

До параметрів технологічного процесу напилення, які характеризують режим роботи плазмотрона і визначають процес нагрівання розпалюваного матеріалу, належать ентальпія, температура та швидкість плазмового струменя.

Із збільшенням потужності дуги інтенсивно збільшується температура і ентальпія плазмового струменя. Вплив витрат плазмоутворювального газу протилежний. Потужність дуги визначається двома параметрами – силою струму та напругою.

Напруга дуги залежить від довжини дуги, яка визначається конструкцією плазмотрона, а також плазмоутворювальним газом та його витратами.

Для напилення застосовують порошки з грануляцією 5 – 100 мкм, дроти діаметром 0,8 – 2,5 мм. Дистанція напилення в даному способі становить 50 – 300 мм.

Ефективність процесу зростає із застосуванням ламінарного потоку плазми або із застосуванням камер зі зниженим тиском.

Залежно від призначення покриття, виділяють вагомі показники якості (що вже описані в лаб. роб. №2).

На міцність зчеплення і пористість впливає розмір частинок які утворюються при розпиленні дроту. Чим менше розмір частинок тим

ці показники кращі. З підвищенням струму (завдяки великим значенням ентальпії) середній розмір частинок зменшується і можна отримати покриття з достатньою адгезійною та когезійною міцністю. З точки зору роботи обладнання, КВМ залежить від декількох факторів: потужність дуги (що обумовлює температуру та величину часток розплавленого дроту), діаметр вихідного сопла розпилювача та витрати газу (що обумовлюють швидкість руху та охолодження потоку частинок). Таким чином величина КВМ може змінюватись зі зміною вказаних параметрів. Для кожного конкретного матеріалу при напиленні слід здійснювати налагодження якісних показників.

Оптимізацію КВМ можна здійснювати дослідженням зміни його величини при зміні дистанції напилення. При малих дистанціях напилення частинки надто перегріті струменем і при зіткненні з поверхнею відбувається їх розбризкування; при великих дистанціях—поверхні зразка досягають вже охолоджені частинки, які не можуть закріпитися на поверхні.

Зміна дистанції напилення обумовлює зміну величини плями напилення (радіусу розсіювання), товщини покриття утвореної за одиницю часу. Для досягнення запланованих показників слід вести розрахунок швидкості переміщення пальника відносно виробу для кожного конкретного випадку.

### **НЕОБХІДНЕ ОБЛАДНАННЯ, ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ**

1. Установка для плазмовою напилення "Київ-7".
2. Порошки для напилення.
3. Терези аналітичні, секундомір, штангенциркуль, лінійка.
4. Сталеві пластинки 250 x 250 x 3 мм.

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Ознайомитись з конструкцією пристосування для вимірювання продуктивності розпилювача, правилами техніки безпеки під час роботи на плазмових установках та переконатися у готовності обладнання до роботи.
2. Скласти план експерименту згідно з завданням викладача.
3. Завантажити порошок у бункер дозатора.
4. Підготувати до напилення зразок (очистити від бруду, обробити на абразивно-струменевій установці).
5. Зважити зразок (масу зразка записати в таблицю 1).
6. Встановити необхідні режимні параметри напилення конкретного матеріалу: вид, витрати та тиск плазмоутворювального газу, напругу та струм дуги, витрати порошкового матеріалу. Занести режимні параметри до табл. 2.
7. Встановити зразок на дистанції 100 мм.
8. Увімкнути установку та встановити режим згідно табл. 2.
9. При нерухомому розпилювачі нанести покриття на зразок. Зафіксувати час напилення і занести його до табл. 1
10. Зважити пластину з покриттям, заміряти діаметр плями напилення, товщину напиленого шару. Результати занести до табл. 1.
11. Скориставшись даними таблиці 1, провести розрахунки КВМ та продуктивності і швидкість переміщення розпилювача відносно виробу за формулами (1), (2) та (3) відповідно. Отримані дані занести до таблиці 3.

12. Повторити п.п. 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11 для інших пунктів плану експерименту для дистанцій напилення 120, 140 та 160 мм.

Таблиця 1 - Результати експериментальних досліджень

№ досл.	Тип поро шку	Грануляц ія порошку $C_n, \text{мм}$	Час напи лення $\tau, \text{с}$	Маса зразка, без покр иття $m_2, \text{г}$	Маса зразка з покр иттям $m_1, \text{г}$	Маса розпиленог о порошку $m_3 = G \cdot \tau, \text{г}$	Діаметр плями напилення $d, \text{мм}$	Товщина напиленого шару $\delta, \text{мм}$

Таблиця 2 - Режимні параметри нанесення покриття

Регульовані параметри					
Напруга на дузі $U, \text{В}$	Струм ду ги $I, \text{А}$	Витрати плазмоутворюва льного газу $V, \text{м}^3/\text{год}$	Витрати порошку $G, \text{г/с}$	Тиск плазмоутворюва льного газу $P, \text{МПа}$	Дистанція напилення $L, \text{мм}$

Таблиця 3 - Отримані розрахункові показники

№ досліду	Дистанція напилення $L, \text{мм}$	КВМ, %	Продуктивність напилення $P$ , $\text{кг/год}$	Швидкість переміщення пальника, $V_{\text{пальн.}}, \text{м/хв}$

## ВИМОГИ ДО ЗВІТУ ПО РОБОТІ

1. Навести мету роботи.
2. Дати опис обладнання та інструментів, які були використані в роботі.
3. Описати порядок виконання роботи. Заповнити табл. 1, 2, 3.



4. Розрахувати продуктивність, КВМ та швидкість переміщення розпилювача відносно виробу. Розраховані дані занести до табл 3.
5. Побудувати залежності КВМ, П та  $V_{\text{пальн.}}$  від L.
6. Висновки по лабораторній роботі.

### **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ**

1. Перерахуйте основні технологічні параметри процесу плазмового напилення.
2. Як відрізняється продуктивність розпилювача по розпиленому та напиленому матеріалу?
3. Як основні параметри технологічного процесу напилення впливають на його продуктивність?
4. Як визначається продуктивність розпилювача? Які шляхи її підвищення?
5. Для чого потрібна інформація про продуктивність розпилювача?
6. Що впливає на значення коефіцієнта використання матеріалу?



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУГ В СИСТЕМІ «ОСНОВА-ПОКРИТТЯ» ПРИ ГАЗОТЕРМІЧНОМУ НАНЕСЕННІ ПОКРИТТЯ

**Мета роботи:** освоїти методики розрахунку залишкових напруг в матеріалі основи та покритті. Експериментально вивчити вплив режимних факторів на залишкові напруги в основі та покритті.

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Формування газотермічного покриття являє собою поступове нашарування окремих часток, нагрітих до стадії плавлення або високо пластичного стану, на практично холодну ( $40-150^{\circ}\text{C}$ ) або попередньо незначно нагріту ( $200-400^{\circ}\text{C}$ ) основу. В результаті таких термічних умов утворення покриття, а також у багатьох випадках наявності значної різниці коефіцієнтів термічного розширення (КТР) матеріалів напилюваного шару і основи в покритті виникають залишкові напруги стиснення і розтягнення. В покриттях присутні внутрішні напруги усіх трьох видів. Напруги першого виду існують у макрооб'ємах покриття; напруги другого виду виникають в окремих частках, що складають покриття, в результаті локальної неоднорідності деформацій; напруги третього виду мають місце в об'ємах часток і зумовлені деформацією решітки, зміною міжатомних відстаней. Напруги другого і третього виду викликані високими швидкостями охолодження часток, які поєднуються зі значними імпульсними навантаженнями при ударі їх об підкладку. Малий час

перебігу цих процесів не дає змоги здійснитися процесам релаксації. Напруги цих двох типів зрівноважені в об'ємі часток, що закристалізувалися.

Напруги першого типу можуть призвести до розтріскування покриття, відшарування його від основи, а у випадку нанесення покриття на основу малої товщини – до її деформації. Поле залишкових напруг у системі основа-покриття має складний характер. Воно може бути неоднорідним, відрізнятися знаком внутрішніх напруг. Це зумовлено нерівномірним розподілом матеріалу в струмені, нерівномірним нагріванням деталі, що особливо різко проявляється при напиленні ручним способом, коли швидкість пересування плями напилення і дистанція напилення змінні. Іншою причиною, що впливає на значення і знак залишкових напруг, є особливість конфігурації деталі: нерівномірність профілю, різнотовщинність, характер кривини та ін.

Для тіл простої форми (пластина, циліндр) напруги, що виникають внаслідок відмінності коефіцієнтів температурного розширення (КТР) покриття і основи, можна розрахувати на основі теорії термопружності. Для нескінченної стрічки з покриттям з обох боків (за умови, що  $E$  і  $\alpha$  не залежать від температури) інтегральні напруги в покритті (з індексом «п») і основи (з індексом «о») можна розрахувати так:

$$\sigma_n = \frac{(\alpha_n - \alpha_o) \cdot \Delta T}{(h_n / h_o) \left( \frac{1 - M_o}{E_o} + \frac{1 - M_n}{E_n} \right)} \quad (1)$$

$$\sigma_o = \frac{(\alpha_n - \alpha_o) \cdot \Delta T}{(h_o / h_n) \left( \frac{1 - M_n}{E_n} + \frac{1 - M_o}{E_o} \right)} \quad (2)$$

де  $\alpha$  - КТР, 1/С;  $\Delta T$  - різниця температур покриття і основи, °С;  $h$  – товщина основи або напиленого покриття, м;  $M$  – коефіцієнт Пуассона;  $E$  – модуль пружності, Па.

На залишкові напруги впливають механічні властивості основи і покриття, їх товщина, а також різниця температур покриття і основи. Значення  $\Delta T$  °С у свою чергу пов'язане із потужністю теплового потоку струменя з напилюваним матеріалом відносно поверхні. Припустимо, що після напилення основа і покриття були нагріті до однакової температури. Тоді, якщо  $\alpha_n \geq \alpha_o$ , в покритті формуються залишкові напруги розтягнення; якщо  $\alpha_n \leq \alpha_o$  - напруги стиснення. Стиснення менш небезпечне, тоді як розтягнення матеріалу покриття може призвести до утворення тріщин.

Експериментально напруга в основі може бути оцінена за прогином тонкої пластини з покриттям:

$$\alpha_o = \frac{1}{6 \cdot h_n \cdot (h_n + h_o)} \cdot \left( \frac{E_n \cdot h_n^3}{1 - M_n^2} + \frac{E_o \cdot h_o^3}{1 - M_o^2} \right) \cdot \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

де  $\rho$  - радіус кривизни пластин із покриттям, який наближено можна розрахувати за формулою:

$$\rho \approx 0.125 \cdot \frac{l}{S_k - S_o} - 0.167 \cdot (S_k - S_o) \quad (4)$$

де  $l$  – довжина зразка;  $S_k$  - стріла прогину зразка після напилення;  $S_o$  - початкова стріла прогину.

## **НЕОБХІДНЕ ОБЛАДНАННЯ, ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ**

1. Устаткування для газотермічного напилення.
2. Порошки для напилення.
3. Сталеві пластини, розміром 130x30x1 мм.

4. Лінійка металева вимірювальна, штангенциркуль.

### **ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ**

1. Скласти план експерименту згідно з завданням викладача.
2. Підготувати до роботи установку газотермічного напилення.
3. Просушити порошок і розподілити по фракціям менш 63 мкм, 63-100 мкм, більш 120 мкм.
4. Засипати відому кількість потрібної фракції порошку до дозатора-живильника і протарувати його, визначивши продуктивність в г/с (кг/с).
5. Підготувати зразки до напилення, піддавши їх абразивно-струменевій обробці з одного боку. Виміряти товщину пластини, її довжину, а в випадку прогину заміряти його стрілу ( $S_0$ ).
6. Згідно з планом експерименту провести напилення на зразок. Після остигання заміряти товщину пластини з покриттям, стрілу прогину  $S_k$ , довжину хорди.
7. За формулою 4 знайти радіус кривизни пластини з покриттям, розрахувати залишкові напруги в основі. Вихідні дані для розрахунків взяти з таблиці 1.
8. За формулами 1 і 2 по завданню викладача провести розрахункову оцінку величини напруги в покритті і основі. Вихідні дані по варіантам взяти з таблиці 2.
9. Результати вимірювань і розрахунків занести в таблицю 3.

Таблиця 1 – Механічні властивості матеріалів

Матеріал	Модуль пружності $E \cdot 10^{-10}$ , Па	Коефіцієнт лінійного розширення $\alpha \cdot 10^6$ , 1/К	Коефіцієнт Пуассона, М
Fe	19.5	15.5	0.28
Ni	18.8	16.5	0.32
Mo	30	8	0.31
ZrO <sub>2</sub>	36	9.6	0.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.6	7.6	0.4

Таблиця 2 – Варіанти вихідних даних для розрахунку залишкових напруг системи «основа-покриття»

Варіант	Матеріал		Товщина, мм		Різниця температур
	основи	покриття	основи	покриття	
1	Fe	ZrO <sub>2</sub>	3	0.3	1500
2	Ni	ZrO <sub>2</sub>	3	0.3	1500
3	Mo	ZrO <sub>2</sub>	3	0.3	1500
4	Fe	ZrO <sub>2</sub>	3	0.6	1500
5	Ni	ZrO <sub>2</sub>	3	0.6	1500
6	Mo	ZrO <sub>2</sub>	3	0.6	1500
7	Fe	Mo	3	0.3	1200
8	Ni	Mo	3	0.3	1200
9	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mo	3	0.3	1200
10	Fe	Mo	3	0.6	1200
11	Ni	Mo	3	0.6	1200
12	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mo	3	0.6	1200

Таблиця 3 – Результати вимірювань і розрахунків

№ пп	Тип мат.	d <sub>ч</sub> , мм	Q <sub>Г</sub> , м <sup>3</sup> /годин	n, %	I, А	U, В	L, мм	P <sub>ТГ</sub> , МПа	h <sub>о</sub> , мм	h <sub>П</sub> , мм	N	G <sub>П</sub> , кг/с	$\sigma_o$
М													

м – номер зразка; d<sub>ч</sub> – грануляція матеріалу; Q<sub>Г</sub> – витрата газу; n – вміст горючого компоненту; I – струм дуги; U – робоча напруга; L – дистанція наплення; P<sub>ТГ</sub> – тиск транспортуючого газу; h<sub>о</sub> – товщина

зразка;  $h_{\Pi}$  – товщина покриття;  $N$  – кількість проходів;  $G_{\Pi}$  – продуктивність напилення.

### **ВИМОГИ ДО ЗВІТУ ПО РОБОТІ**

1. Привести мету роботи.
2. Дати короткий опис обладнання, яке використовується у роботі.
3. Навести план експерименту.
4. Описати порядок виконання роботи.
5. Заповнити таблицю 3.
6. Побудувати графіки залежності  $\sigma_0$  від режимних параметрів напилення.

### **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ**

1. Які основні причини виникнення внутрішніх залишкових напруг в пластині та покритті при газотермічному напиленні?
2. Які фактори впливають на напругу? Проаналізуйте їх вплив. Які спрощення прийняті при виведенні формули 1 та 2 ?
3. Проаналізуйте зв'язок режимних параметрів розпилювача з факторами, які враховані в розрахункових формулах?



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

### ВИВЧЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ ЧАСТИНОК МАТЕРІАЛУ В ПРОЦЕСІ НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТЯ

**Мета роботи:** експериментально визначити швидкість частинок матеріалу і встановити вплив на неї режимних та конструктивних параметрів розпилювача.

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Високотемпературний струмінь продуктів горіння, потік плазми або розпилюючий газ електродугового розпилювача надають частинкам матеріалу певний запас кінетичної енергії у вигляді швидкості руху частинок, які далі формують покриття. Відомо, що температура і швидкість газу розподілені нерівномірно в перерізі струменю. Мова іде про наявність великих градієнтів швидкості і температури вздовж і поперек потоку. Рух частинки речовини визначається сумарною дією на неї цілого ряду сил, напрямок і величина яких різні. Це сили, які виникають в результаті градієнту тиску у потоці, сила, яка обумовлена обертанням частинки внаслідок градієнту швидкості в поперечному перерізі струменя, сила, яка обумовлена нестационарністю процесу і залежить від характеру руху частинки за попередній період часу, сила тяжіння та інші сили. Основною силою, яка діє на частинку у високошвидкісному потоці є сили аеродинамічного опору. Всі інші сили мають значно меншу величину.

Частинки матеріалу, який напилюється, прискорюються потоком внаслідок дії сил в'язкості та динамічного напору. Якщо ввести ряд припущень: частинки сферичні і мають однаковий діаметр, їх розподіл по перерізу рівномірний, частинки не взаємодіють між собою і соплом, нема випаровування матеріалу частинок і наявність твердої фази не впливає на термодинамічні та теплофізичні властивості газу, то рівняння руху можна записати у вигляді:

$$V_1 \cdot \left( \frac{d \cdot V_1}{d_x} \right) = \left( \frac{3 \cdot \gamma_2 \cdot C_x}{4 \cdot \gamma_1 \cdot d} \right) \cdot (V_{\Pi} - V_1)^2 \quad (1)$$

де  $d_x$  - шлях, який пройшла частинка;  $V_1$  - швидкість частинки;  $V_{\Pi}$  - швидкість потоку;  $\gamma_1$  - густина матеріалу частинки;  $\gamma_2$  - густина газу потоку;  $d$  - діаметр частинки;  $C_x$  - коефіцієнт аеродинамічного опору частинки.

Досить суттєві припущення, які були прийняті при розгляданні процесу прискорення частинки і відсутність достовірних відомостей про коефіцієнти аеродинамічного опору в умовах газотермічного напilenня не дають змоги отримувати кількісні значення швидкості руху частинок для реальних умов напilenня. Для отримання більш достовірної інформації використовують експериментальні методи вимірювання швидкості частинок, існує багато методів вимірювання швидкості: метод обертового диска, метод радіоактивних ізотопів, метод стробоскопічного освітлювання, метод покадрової фотознімки, метод безперервної фотознімки, метод обертового дзеркала, метод фотоелектричної реєстрації, метод стробоскопічної фотознімки та інші. Кожний з названих методів має свої переваги і недоліки.

У лабораторній роботі використаний найбільш простий і наглядний метод - метод обертового диска (рис.1.).

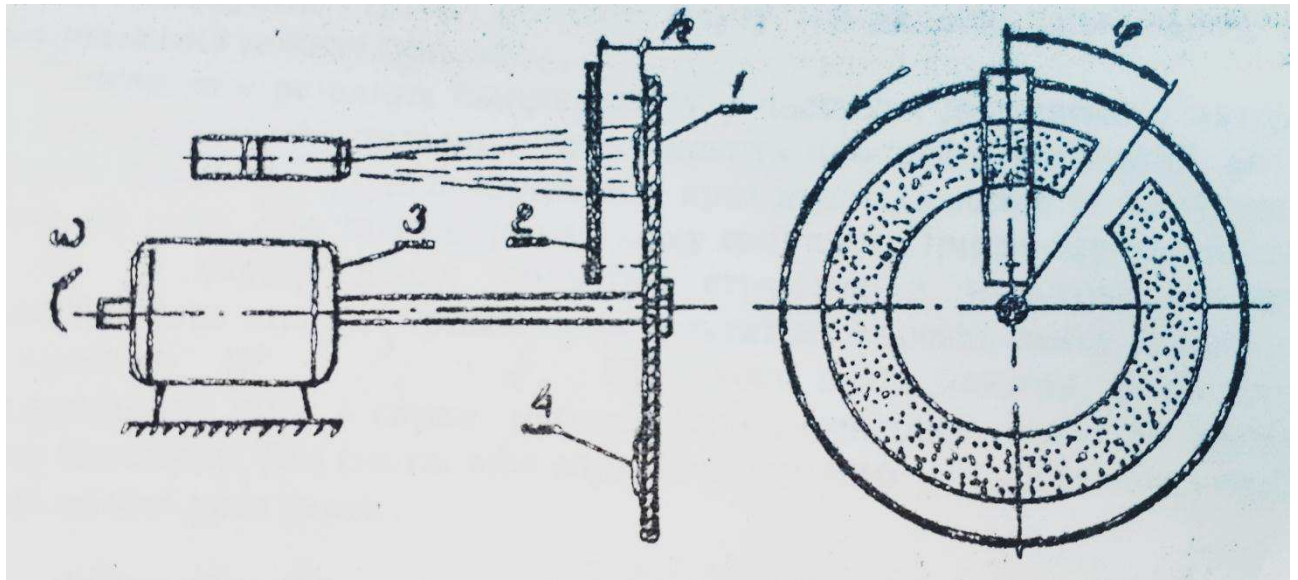


Рис.1 – Схема вимірювання швидкості руху частинок

Прилад складається із диска 1, який обертається разом з екраном 2 за допомогою електродвигуна 3. Диск 1 і екран 2 зміщені між собою на відомо фіксовану відстань  $h$ . У процесі вимірювання при обертанні диска 1 на ньому відкладається покриття 4. Частина диска екранується екраном 2, тому на диску буде площа, на якій покриття немає. Ця пляма зміщена відносно екрана на деякий кут  $\varphi$ . По величині цього зміщення і відстані від центру диска до точки вимірювання можна підрахувати швидкість руху частинок  $V_q$ :

$$V_q = (h - h_i) \cdot 2 \cdot \pi \cdot \omega / \varphi \quad (2)$$

де  $\omega$  - частота обертання диска;  $h_i$  - товщина покриття;  $\varphi$  - кут зміщення плями відносно екрана.

У ряді випадків більш зручним є інший варіант цієї формули:

$$V_q = (h - h_i) \cdot 2 \cdot \pi \cdot z_i \cdot \omega / l_i \quad (3)$$

де  $z_i$  - відстань від осі диска до точки вимірювання;  $l_i$  - зміщення у лінійних одиницях.

Деяку складність у цій методиці являє визначення частоти обертання диска. Для цього використовується годинниковий

тахометр типу СК. Тахометр призначений для вимірювання числа обертів валів, а також лінійних швидкостей шківів, ременів і т.п. Вимірювання проводиться за допомогою спеціальних фрикційних наконечників, які надіваються на вал тахометра.

Для вимірювання числа обертів вала необхідно:

- а) наконечник приводного валика тахометра притиснути до торця вала двигуна, число обертів якого ми вимірюємо, таким чином, щоб їх осі співпадали і валик тахометра почав обертатися;
- б) натиснути і відпустити велику кнопку на корпусі тахометра. При цьому годинниковий механізм тахометра повинен почати рухатись;
- в) після зупинки механізму провести відлік показу по шкалі;
- г) встановити стрілки на нуль натискуванням малої кнопки. Між двома вимірами треба робити паузу 15-20 сек. для запобігання викривлення показу приладу.

Метод вимірювання швидкості руху частинок дисперсного матеріалу за допомогою обертального диска досить простий і наглядний, але має суттєві недоліки. При вимірюванні враховуються лише ті частинки, які осіли на диск, або залишили на ньому свій слід. При цьому частинки, які летять у периферійних областях струменя з низькою швидкістю ускладнюють аналіз отриманих результатів і вносять деяку похибку при визначенні  $(\varphi, l_i, h_i)$ . Крім того потік повітря, який створює обертальний диск і екран, направлений перпендикулярно до напрямку руху частинок. Він спотворює справжню картину у області вимірювання і його важко врахувати.

## **НЕОБХІДНЕ ОБЛАДНАННЯ, ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ**

1. Установка для плазмового або газополуменевого напилення.

2. Прилад для вимірювання швидкості методом обертового диска.
3. Годинниковий тахометр СК.
4. Порошковий матеріал.
5. Ситовий набір.
6. Штангенциркуль, кутомір, лінійка.

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. За допомогою ситового набору просіяти порошок і виділити фракції 63-100 мкм, 100-120 мкм, < 63 мкм.
2. Завантажити порошок у порошок дозатор і запустити установку газотермічного напилення.
3. Скласти план експерименту.
4. Встановити дистанцію напилення, струм дуги, витрату плазмоутворюючого газу та його склад згідно з планом експерименту.
5. Включити привід диска і за допомогою тахометра виміряти швидкість обертання диска.
6. Провести напилення на диск протягом 15-20 сек.
7. Вимкнути установку і провести вимірювання кута зміщення плями без покриття відносно екрана.
8. Результати вимірювань занести до таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати вимірювань

№ з/п	I, А	Q <sub>с</sub> , м <sup>3</sup> /годин	n, %	L, мм	h <sub>i</sub> , мм	$\omega$ , об/хв	$l_i$ , мм	Швидкість, м/с
м								

де: м – номер експерименту; I – струм дуги; L – дистанція напилення; n – вміст вуглеводневого компонента; h<sub>i</sub> – відстань від осі до точки вимірювання; Q<sub>с</sub> – витрата газу;  $\omega$  – частота обертання;  $l_i$  – зміщення.

## **ВИМОГИ ДО ЗВІТУ**

1. Привести мету роботи.
2. Дати короткий опис обладнання, яке використовується в роботі.
3. Привести план експериментів.
4. Описати порядок виконання роботи.
5. Підрахувати значення швидкості для кожного випадку вимірювання за формулою 3 і занести в таблицю 1.
6. Побудувати графіки залежності швидкості руху частинок від дистанції напилення, витрати плазмоутворюючого газу, його складу і струму дуги.
7. Висновки по лабораторній роботі.

## **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ**

1. Які існують загальні вимоги до швидкості частинок матеріалу при газотермічному напиленні покриттів?
2. Що впливає на швидкість руху частинок матеріалу, який напилюється ?
3. Які існують методи вимірювання швидкості руху частинок?
4. Які режимні фактори використовуються для регулювання швидкості частинок матеріалу?
5. Які експлуатаційні характеристики покриттів пов'язані із швидкістю руху частинок при напиленні?

## ЛІТЕРАТУРА

1. Методичні вказівки до лабораторних робіт для студентів напрямку підготовки 6.050504 «Зварювання»./Укл. В.М. Корж, Д.В. Степанов, О.С. Василенко – К.:НТУ «КПІ», 2012р.-23с.
2. Корж В.М. Технологія та обладнання для напилення: Навчальний посібник. К.:НМЦ ВО, 2000. -152с.
3. В.М. Корж, В.Д. Кузнецов, Ю.С. Борисов, К.А. Ющенко. Нанесення покриття. Навчальний посібник. К.: Видавництво Арістей, - 2005. -204с.
4. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: Учеб. для вузов (В.Н.Анциферов, Г.В.Бобров, Л.К.Дружинин и др.); Под. ред. Б.С.Митина: Металлургия, 1987.-792с.
5. Теория и практика газопламенного напыления./П.А. Витязь, В.С. Ивашко, Е.Д. Манайло и др. - М. Наука и техника, 1993. - 295с.
6. Газотермическое напыление покрытий. Сборник руководящих технических материалов. -К.: ИЭС им. Е.О. Патона, 1993. - 175с.
7. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник./ Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.П. Ардатовская. - К.: Наукова думка, 1987. - 544с.
8. Мовчан Б.А., Малашенко И.С.. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме: - К.: Наукова думка, 1983. - 232с.
9. К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. Інженерія поверхні: підручник К. Наукова думка, 2007 - 558с.
10. Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. –М.:Химия, 1976. -296 с.

- 11.Аппен А.А. Температуроустойчивые неорганические покрытия. 2-е изд. перераб. и доп. Л: Химия, 1976. – 296с.
- 12.Кудинов В.В., Пекшев П.Ю., Белашенко В.Е. и др. Нанесение покрытий плазмой. –М.: Наука, 1990. -408с.
- 13.Максимович Г.Г., Шатинский В.Ф., Копылов В.И. Физико-химические процессы при плазменном напылении и разрушении материалов с покрытиями. - Киев: Наук. Думка, 1983. -264с.
- 14.Кудинов В.В., Иванов В.М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий. – М.: Машиностроение, 1981. -192с.
- 15.Хасуи А. Техника напыления. Пер. с японського – М.: Машиностроение, 1975. – 288с.